陕北白绒山羊断奶羔羊微量元素需求量

周广琛　王　浩　林昌龙　陈玉林*　杨雨鑫*

(西北农林科技大学动物科技学院，杨凌 712100)

摘　要：本试验旨在探究不同水平的微量元素对陕北白绒山羊断奶羔羊生产性能、营养物质消化代谢和组织中微量元素沉积量的影响。选择 6 月龄、体重约为 20 kg 的陕北白绒山羊 24 只，随机分为 4 组，每组 3 个重复，每个重复 2 只羊。各组分别添加不同水平的微量元素，Ⅰ组饲粮铁、铜、锌、锰、钴含量分别为 279.30、15.35、63.41、68.51、0.22 mg/kg，Ⅱ组分别为 290.14、18.19、81.62、94.10 mg/kg，**Ⅲ组分别为** 302.23、28.20、103.28、133.85、0.43 mg/kg，Ⅳ组分别为 319.74、31.60、126.64、167.07、0.67 mg/kg。饲养试验共 65 d，其中预试期 5 d，正试期 60 d。饲养试验正试期第 30 天，从每个重复中随机挑选 1 只羊，共 12 只，分别放入单独的代谢笼中进行消化代谢试验。预试期 7 d，正试期 7 d。饲养试验最后 1 d，将剩余的 12 只羊屠宰，采集羊的心脏、肝脏、脾脏、肾脏及背最长肌，测定微量元素沉积量。结果表明：1）Ⅱ组平均日增重、料重比分别显著高于、低于Ⅰ组（$P<0.05$），与Ⅲ、Ⅳ组差异不显著（$P>0.05$）；Ⅱ组干物质采食量显著高于其他组（$P<0.05$）。2）Ⅰ、Ⅱ组粪能、尿能显著低于Ⅲ、Ⅳ组（$P<0.05$），总能消化率显著高于Ⅲ、Ⅳ组（$P<0.05$）。3）Ⅲ组氮沉积率、进食氮、可消化氮、沉积氮最高，显著高于Ⅰ、Ⅳ组（$P<0.05$），与Ⅱ组差异不显著（$P>0.05$）。4）各微量元素表观代谢率随微量元素添加水平升高呈先增加后减少趋势，Ⅱ组铜、铁、锰、锌、钴表观代谢率最高。5）Ⅱ组背最长肌、心脏的锰沉积量最高，肝脏铁、碘、铜、锰沉积量最高；在脾脏中，Ⅱ组铁沉积量最高，Ⅳ组碘沉积量最高；在肾脏中，Ⅱ组锌沉积量最高, Ⅰ组碘沉积量最高。在本试验条件下，陕北白绒山羊微量元素需要量的最佳组合为：铁 290.14 mg/kg、铜 18.19 mg/kg、锌 81.62 mg/kg、锰 94.10 mg/kg、钴 0.31 mg/kg。

关键词：陕北白绒山羊；微量元素；生产性能；组织沉积

中图分类号:S826

收稿日期：2017-10-23

基金项目：国家绒毛用羊产业技术体系（CARS-39-12）;公益性行业(农业)科研专项（201303059）;陕西省科技攻关项目（2014K01-17-04）

作者简介：周广琛（1993-），男，山西太原人，硕士研究生，从事动物营养和饲料科学的研究。E-mail: aqianli@163.com

*通信作者：陈玉林，教授，博士生导师,E-mail: chenyulindk@163.com；杨雨鑫，副教授，硕士生导师,E-mail: yangyuxin2002@126.com

陕北白绒山羊是一种以产绒为主，肉毛兼用的山羊新品种，是广大陕北地区人民的重要经济来源，对当地的经济发展的作用日趋重要。因此，充分发挥陕北白绒山羊的生产能力，提高其生产效率，对促进当地经济发展、提高人民收入至关重要。饲粮中的微量元素虽然不直接参与动物生长以及脂肪沉积等生理过程，但是参与了这些生理过程的调控，它们对提高动物健康水平、生产性能起着至关重要的作用[1]。不恰当地添加微量元素，不仅会影响家畜生长发育，而且会出现贫血，骨骼畸形等病症。虽然 NRC（1981）[2]和 AFRC(1997)[3]已经给出了山羊营养需要的推荐值。但目前并没有针对性的对于山羊特殊的体质指定合理的微量元素添加水平，NRC（1981）[2]山羊饲养标准和 NRC（1985）[4]绵羊饲养标准关于微量元素的建议添加水平是相同的，而此饲养标准一直未曾进行修订。近些年来，动物的饲养水平和饲养环境已经发生巨大的改变，这 2 项标准已经无法满足当前的要求。比如 NRC（1981）[2]中山羊日常饲粮中铜的建议添加水平为 7~11 mg/kg DM，而吕爱军等[5]研究得出，小尾寒羊对铜的需要量为 25 mg/kg DM。另外 Solaiman 等[6]研究证明，山羊和绵羊对铜的需要量存在显著差异，山羊对铜的需要量高于绵羊。因此，AFRC（1997）[3]和 NRC（2007）[7]在制定标准时，建议根据每个地方生态环境不同、饲养的品种不同，开展试验来研究这些品种在特定生态条件下的营养需要量。目前有关陕北白绒山羊营养的研究在蛋白质、能量、钙磷需要量方面已经有所进展[8-10]。而有关陕北白绒山羊铜、铁、锰、锌、钴等微量元素需求的研究还未有报道。实际生产中由于微量元素添加水平不当，陕北白绒山羊出现尿结石、贫血以及骨骼发育畸形等症状，严重影响了陕北白绒山羊的健康以及生产性能，所以及时开展有关陕北白绒山羊对微量元素需要量的研究意义重大。本试验通过研究饲粮中不同微量元素添加水平对陕北白绒山羊生产性能、营养物质消化代谢和组织中微量元素沉积量的影响，确定陕北白绒山羊对各微量元素的需求，为陕北白绒山羊的饲粮配制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验动物及试验方法

试验选择来自陕西省榆林市横山县陕北白绒山羊原种场的日龄接近、体重及体况相似、健康的 6 月龄陕北白绒山羊 24 只，随机分为 4 组，每组 3 个重复，每个重复 2 只羊，各组在饲粮中添加不同水平的微量元素。基础饲粮参照 NRC（2007）[7]设计，其组成及营养水平见表 1。微量元素添加形式及纯度见表 2。饲粮中微量元素添加水平及实测值见表 3。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米秸秆 Corn stover	39.00
玉米 Corn	22.81
苜蓿草粉 Alfalfa meal	16.46
小麦麸 Wheat bran	6.00
棉籽粕 Cottonseed meal	5.00
菜籽粕 Rapeseed meal	4.00
大豆粕 Soybean meal	2.77
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.48
预混料 Premix[1)]	1.50
小苏打 $NaHCO_3$	0.50
食盐 NaCl	0.48
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
干物质 DM	87.20
消化能 DE/（MJ/kg）	9.40
粗蛋白质 CP	13.00
钙 Ca	0.80
总磷 TP	0.55
粗纤维 CF	6.30
粗脂肪 EE	1.60
粗灰分 Ash	4.70

[1)]每千克预混料含有 One kg of premix provides the following:VA 5 400 000 IU，VD_3 10 800 000 IU，VE 180 000 000 IU，VK_3 5 g，VB_1 2 g，VB_2 15 g，VB_{12} 0.03 g，泛酸 pantothenic acid 35 g。

[2)]实测值 Measured vales。

表 2　微量元素添加形式及纯度

Table 2　Supplemental forms and purity of trace elements

微量元素 Trace elements	添加形式 Supplemental form	纯度 Purity/%
铁 Fe	$FeSO_4·H_2O$	30.0
铜 Cu	$CuSO_4·5H_2O$	25.0
锌 Zn	$ZnSO_4·H_2O$	34.5
锰 Mn	$MnSO_4·H_2O$	31.8
钴 Co	$CoCl_2·6H_2O$	1.0

表 3　饲粮中微量元素添加水平及实测值

Table 3　Supplemental levels and measured values of trace elements in diets　　mg/kg

组别	添加水平 Supplemental levels						实测值 Measured values					
Groups	铁 Fe	铜 Cu	锌 Zn	锰 Mn	钴 Co	碘 I	铁 Fe	铜 Cu	锌 Zn	锰 Mn	钴 Co	碘 I
Ⅰ	25.00	5.00	40.00	50.00	0.08	0.12	279.30	15.35	63.41	68.51	0.22	0.34
Ⅱ	35.00	10.00	60.00	80.00	0.15	0.18	290.14	18.19	81.62	94.10	0.31	0.42
Ⅲ	45.00	20.00	80.00	120.00	0.25	0.25	302.23	28.20	103.28	133.85	0.43	0.51
Ⅳ	60.00	25.00	100.00	150.00	0.50	0.50	319.74	31.60	126.64	167.07	0.67	0.74

1.2 饲养管理

采取室内单栏饲养，避免试验羊误食除饲粮外的其他外源物。每天 08:00 和 16:00 进行饲喂，每次饲喂 1 kg 的饲粮，保证采食后有剩余，每日准确记录喂料量和剩料量。饲养试验共 65 d，其中预试期 5 d，正试期 60 d。保证每只羊能自由采食。且每天给予试验羊充足饮水。每日准确记录喂料量和剩料量。

1.3 样品采集和测定指标

1.3.1 生产性能

在试验的开始和结束当天，以重复为单位空腹称重，准确记录每日采食量，计算平均日增重（ADG）、料重比。

料重比= 干物质采食量/平均日增重。

1.3.2 营养物质消化代谢

在正式期第 30 天，从每个重复中随机挑选 1 只羊，共 12 只，分别放入单独的代谢笼中进行消化代谢试验。预试期 7 d，正试期 7 d。正试期开始后，每天 08:00 和 18:00 进行粪尿收集。准确记录粪尿量，每天将鲜粪样称重后按 10%采样，并且按每 100 g 鲜粪样加 10 mL 10%硫酸进行固氮。记录每天总排尿量后按 10%取样，并且按每 1 000 mL 尿样加 5 mL 浓硫酸进行固氮。最后，将 7 d 收集粪样混合均匀，65 ℃烘干 48 h，之后回潮称重获得分析样本，测定初水分后，冷冻保存；将 7 d 收集的尿样混合均匀，于-20 ℃冷冻保存备用。饲粮中常规成分按照常规方法用凯氏定氮仪、氧弹热力计、原子吸收分光光度计等仪器进行测定[11]，粪和尿中的干物质含量及粪能和尿能同样使用以上仪器并参考贺建华[12]介绍的方法进行测定。

采用 Blaxter 等[13]的方法推算甲烷能，公式如下：

$$甲烷能=3.67+0.062D。$$

式中：甲烷能以占总能的百分比表示(%GE)；D 为母羊摄入饲粮总能消化率（%）。

根据对 4 组饲粮及其相应粪能、尿能测定结果，并结合甲烷能估算结果，按照以下公式

[14]计算能量代谢指标:

总能消化率(%)=[（总能－粪能）/总能]×100；

总能代谢率(%)=[（总能－粪能－尿能－甲烷能）/总能]×100；

消化能代谢率(%)=[(总能－粪能－尿能－甲烷能)/(总能－粪能)]×100。

1.3.3　微量元素

正试期最后 1 d，将剩余的 12 只羊集中屠宰。试验羊屠宰时应该按照 NY/T 1340-2007 和 NY/T 1341-2007 的规定执行，将试验羊屠体进行处理，去除不必要的器官、脂肪等，保留心脏、肝脏、脾脏、肾脏、背最长肌等组织，将采集好的组织样品制成匀浆，作为测定微量元素的样品保存备用。参考 GB/T 5009.90-2003、GB/T 5009.13-2003 和 GB/T 5009.14-2003 中的方法测定微量元素（铁、锰、铜、锌、钴、碘）含量，每个试样重复测定 2 次。

按以下公式计算微量元素表观代谢率：

$$微量元素表观代谢率（\%）=\frac{微量元素进食量-微量元素排泄量}{微量元素进食量}\times 100。$$

1.4　数据统计分析

试验数据经 Excel 2007 初步处理，采用 SPSS 19.0 中的 ANOVA 过程进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，采用 LSD 法进行多重比较。以 $P<0.05$ 为差异显著性判断标准。结果用“平均值±标准差”表示。

2　结　果

2.1　生产性能

不同微量元素水平对陕北白绒山羊生产性能的影响见表 4。由表可见，随着饲粮微量元素水平的上升，平均日增重呈先上升后下降的趋势，其中 II 组最高，显著高于 I 组（$P<0.05$），但与III、IV组差异不显著（$P>0.05$）。干物质采食量除 I 、IV组没有显著差异（$P>0.05$）外，其他组之间均有显著差异（$P<0.05$），II 组干物质采食量显著高于其他组（$P<0.05$）。II 组料重比显著低于 I 组（$P<0.05$），与III、IV组差异不显著（$P>0.05$）。

表 4　不同微量元素水平对陕北白绒山羊生产性能的影响

Table 4　Effects of different trace element levels on performance of *Shaanbei* white cashmere goats

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV

初始体重 Initial BW/kg	20.65±1.59	21.01±4.38	21.46±2.07	21.89±1.31
结束体重 Final BW/kg	22.56±0.56[b]	24.25±2.21[a]	24.90±0.91[a]	25.10±0.45[a]
平均日增重 ADG/(g/d)	37.56±2.08[b]	70.42±3.24[a]	62.25±8.50[a]	53.34±7.92[ab]
干物质采食量 DMI/（kg/d）	0.99±0.04[b]	1.03±0.06[a]	0.97±0.01[c]	1.00±0.04[b]
料重比 F/G	26.36[a]	14.67[b]	15.64[b]	18.81[ab]

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P＞0.05)，不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P＞0.05), values with different small letters mean significant difference (P<0.05). The same as below.

2.2　能量代谢

不同微量元素水平对陕北白绒山羊能量代谢的影响见表 5。由表可见，4 组进食总能没有显著差异（P>0.05）。粪能、尿能方面，低添加水平（Ⅰ、Ⅱ组）和高添加水平（Ⅲ、Ⅳ组）间有显著差异（P＜0.05），随着微量元素水平的升高均呈上升的趋势。低添加水平（Ⅰ、Ⅱ组）总能消化率显著高于高添加水平（Ⅲ、Ⅳ组）（P＜0.05）。甲烷能、消化能、代谢能和总能代谢率虽然各组之间不存在显著差异（P>0.05），但是总体随微量元素水平的升高呈现先上升后下降趋势。

表 5　不同微量元素水平对陕北白绒山羊能量代谢的影响

Table 5　Effects of different trace element levels on energy metabolism of *Shaanbei* white cashmere goats

项目 Items	组别 Groups			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
进食总能 GE intake/(MJ/d)	16.21±0.54	16.68±1.70	16.79±0.38	16.34±0.89
粪能 Fecal energy/(MJ/d)	6.47±0.25[b]	6.55±0.83[b]	6.97±0.59[a]	7.00±0.52[a]
尿能 Urine energy/(MJ/d)	0.12±0.003[b]	0.14±0.02[b]	0.19±0.06[a]	0.20±0.02[a]
消化能 Digestible energy/(MJ/d)	9.74±0.29	10.13±0.87	9.82±0.21	9.34±0.37
甲烷能 CH_4 energy/(MJ/d)	2.81±0.04	2.85±0.63	2.70±0.01	2.67±0.03
代谢能 Metabolizable energy/(MJ/d)	6.81±0.25	7.14±0.25	6.93±0.26	6.47±0.34
总能消化率 Digestibility of GE/%	60.08±0.06[a]	60.73±0.05[a]	58.48±3.01[b]	57.16±0.55[b]
总能代谢率 Metabolic rate of GE/%	42.01±0.49	42.80±4.80	41.27±1.95	39.59±2.48

2.3　氮代谢

不同微量元素水平对陕北白绒山羊氮代谢的影响见表 6。由表可见，Ⅲ组氮沉积率最高，显著高于Ⅰ、Ⅳ组（P<0.05），与Ⅱ组差异不显著（P>0.05）。Ⅲ组进食氮最高，与Ⅱ组差异不显著（P>0.05），显著高于Ⅰ、Ⅳ组（P<0.05）。Ⅰ组粪氮最高，显著高于Ⅱ、Ⅳ组（P<0.05），与Ⅲ组差异不显著（P>0.05）。Ⅳ组尿氮最高，与Ⅱ组差异不显著（P>0.05），显著高于Ⅰ、

III组（P<0.05）。可消化氮、沉积氮的差异情况与进食氮一致。

表 6　不同微量元素水平对陕北白绒山羊氮代谢的影响

Table 6　Effects of different trace element levels on nitrogen metabolism of *Shaanbei* white cashmere goats

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV
进食氮 N intake/(g/d)	14.20±0.53^{b}	16.42±1.67^{a}	16.99±0.38^{a}	13.24±0.86^{b}
粪氮 Fecal N/(g/d)	4.56±0.23^{a}	3.46±0.69^{b}	3.85±0.69^{a}	3.30±0.97^{b}
尿氮 Urine N/(g/d)	2.17±1.14^{b}	2.68±0.40^{a}	2.04±0.02^{b}	2.85±1.74^{a}
可消化氮 Digestible N/(g/d)	9.64±0.30^{b}	12.96±0.98^{a}	13.14±0.31^{a}	9.94±0.10^{b}
沉积氮 Retention N/(g/d)	7.47±0.84^{b}	10.28±0.58^{a}	11.10±0.33^{a}	7.09±1.64^{b}
氮沉积率 N retention rate/%	52.6±2.21^{c}	62.60±3.56^{a}	65.35±4.58^{a}	53.55±3.18^{b}

2.2.3　微量元素代谢

不同微量元素水平对陕北白绒山羊微量元素代谢的影响见表 7。由表可见，II 组铜表观代谢率最高，与 I 、III组相比差异不显著（P>0.05），显著高于IV组（P<0.05）。II 组铁表观代谢率最高，显著高于 I 组（P<0.05），与III、IV组间差异不显著（P>0.05）。II 组锰表观代谢率最高，显著高于III、IV组（P<0.05），与 I 组差异不显著（P>0.05）。II 组锌表观代谢率最高，显著高于 I 、III、IV组（P<0.05）， I 、III组间差异不显著（P>0.05）。II 组钴表观代谢率最高，显著高于IV组（P<0.05），与 I 、III组差异不显著（P>0.05）。总体上，各微量元素表观代谢率随微量元素添加水平升高呈先增加后减少趋势。

表 7　不同微量元素水平对陕北白绒山羊微量元素代谢的影响

Table 7　Effects of different trace element levels on trace element metabolism of *Shaanbei* white cashmere goats

项目 Items		组别 Groups			
		I	II	III	IV
铁 Iron	进食量 Intake/(mg/d)	236.94±6.05	280.47±15.47	328.93±23.68	336.26±22.91
	排泄量 Excretion/(mg/d)	209.17±4.43	225.10±9.94	281.85±16.48	287.33±15.42
	表观代谢率 Apparent metabolic rate/%	11.72±1.82^{b}	19.74±3.54^{a}	14.31±3.00^{ab}	14.55±1.48^{ab}
锰 Manganese	进食量 Intake/(mg/d)	58.12±1.48	90.96±5.02	145.67±10.48	175.70±11.97
	排泄量 Excretion/(mg/d)	52.21±0.37	78.63±2.02	134.03±6.47	162.05±8.41
	表观代谢率 Apparent metabolic rate/%	10.16±1.04^{ab}	13.56±2.84^{a}	7.99±2.28^{b}	7.77±0.46^{b}
铜 Copper	进食量 Intake/(mg/d)	13.02±0.33	17.58±0.97	30.69±2.21	33.23±2.26
	排泄量 Excretion/(mg/d)	11.18±0.28	14.85±0.75	26.29±1.43	28.83±0.72
	表观代谢率 Apparent metabolic rate/%	14.15±0.08^{ab}	15.52±0.34^{a}	14.35±0.51b^{a}	13.24±0.18^{b}
锌 Zinc	进食量 Intake/(mg/d)	53.79±1.37	78.90±4.35	112.40±8.09	133.18±9.07
	排泄量 Excretion/(mg/d)	47.99±1.24	65.97±5.47	99.32±9.22	114.96±10.9
	表观代谢率 Apparent metabolic rate/%	10.79±0.07^{c}	16.39±0.75^{a}	11.64±0.73^{c}	13.68±0.36^{b}

钴 Cobalt	进食量 Intake/(mg/d)	0.1866±0.0047	0.2996±0.017	0.4680±0.03	0.7046±0.048
	排泄量 Excretion/(mg/d)	0.1655±0.0039	0.2641±0.0183	0.4181±0.0288	0.6313±0.0439
	表观代谢率 Apparent metabolic rate/%	11.32±0.21[ab]	11.84±0.76[a]	10.63±0.40[ab]	10.41±0.18[b]

2.3 组织微量元素沉积量

陕北白绒山羊各组织中微量元素沉积量见表 8。

在背最长肌中，Ⅱ组的锰沉积量显著大于Ⅰ、Ⅲ组(P<0.05)；其他 5 种微量元素的沉积量在各组间并不存在显著性差异（P>0.05）。

在心脏中，Ⅲ组锰微量元素的沉积量显著大于Ⅱ组(P<0.05)；其他 5 种微量元素的沉积量在各组间并不存在显著性差异（P>0.05）。

在肝脏中，Ⅱ组铁、铜沉积量显著大于Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ组(P<0.05)，Ⅲ组显著大于Ⅳ组(P<0.05)；Ⅱ、Ⅲ组锰沉积量显著大于Ⅰ组(P<0.05)，与Ⅲ、Ⅳ组没有显著差异（P>0.05）；Ⅱ组碘沉积量显著大于Ⅰ、Ⅳ组(P<0.05)；而其他 2 种微量元素沉积量在各组间无显著性差异（P>0.05）。

在脾脏中，Ⅱ组铁沉积量显著大于Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ组(P<0.05)，Ⅲ组显著大于Ⅰ、Ⅳ组(P<0.05)；Ⅳ组碘沉积量显著大于Ⅰ、Ⅲ组(P<0.05)；而其他 4 种微量元素沉积量在各组间没有显著性差异（P>0.05）。

在肾脏中，Ⅱ组锌沉积量显著大于Ⅰ、Ⅲ组(P<0.05)；Ⅰ组碘沉积量显著大于Ⅱ、Ⅲ组(P<0.05)；其他 4 种微量元素则沉积量在各组间没有显著性差异（P>0.05）。

表 8 陕北白绒山羊组织中微量元素沉积量（鲜重基础）

Table 8 Deposition of trace elements in tissues of *Shaanbei* white cashmere goats (fresh weight basis) mg/kg

项目 Items	组别 Groups			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
背最长肌 Longissimus dorsi				
铁 Fe	21.04±3.02	19.60±2.82	25.91±3.48	24.12±2.62
锰 Mn	0.09±0.09[b]	0.29±0.08[a]	0.11±0.05[b]	0.16±0.09[ab]
锌 Zn	0.59±0.36	0.78±0.37	0.36±0.49	0.84±0.21
碘 I	0.010 6±0.007 1	0.019 1±0.010 1	0.010 5±0.006 7	0.011 6±0.003 7
钴 Co	0.59±0.36	0.78±0.37	0.36±0.49	0.84±0.21
铜 Cu	0.64±0.48	0.63±0.15	0.30±0.11	0.83±0.31
心脏 Heart				
铁 Fe	29.25±3.33	28.06±3.79	27.57±4.39	31.23±5.30
锰 Mn	0.04±0.03[ab]	0.03±0.01[b]	0.08±0.02[a]	0.06±0.018[ab]
锌 Zn	13.32±2.82	14.57±1.92	12.01±1.89	12.21±0.71
碘 I	0.012 9±0.009 8	0.006 7±0.008 7	0.007 1±0.002 1	0.002 6±0.001 6
钴 Co	0.25±0.01	0.27±0.03	0.26±0.01	0.28±0.01

铜 Cu	0.45±0.31	0.09±0.14	0.13±0.08	0.44±0.14
肝脏 Liver				
铁 Fe	52.47±5.57^{bc}	86.72±8.69^{a}	65.67±7.67^{b}	43.39±2.82^{c}
锰 Mn	1.00±0.10^{b}	1.42±0.18^{a}	1.37±0.06^{a}	1.18±0.31^{ab}
锌 Zn	31.48±6.45	31.59±2.62	29.67±3.53	25.60±4.38
碘 I	0.008 3±0.005 8^{b}	11.840 0±0.760 0^{a}	10.630 0±0.400 0^{ab}	10.410 0±0.180 0^{b}
钴 Co	0.13+0.30	0.34+0.01	0.67+0.02	0.76+0.05
铜 Cu	45.45±4.41^{b}	73.71±6.80^{a}	58.15±4.19^{b}	40.50±5.44^{b}
脾脏 Spleen				
铁 Fe	61.04±6.54^{c}	120.65±8.53^{a}	88.58±7.90^{b}	68.48±6.86^{c}
锰 Mn	0.30±0.14	0.31±0.14	0.23±0.17	0.31±0.25
锌 Zn	23.25±2.77	26.62±8.54	24.32±1.90	23.18±3.10
碘 I	0.010 6±0.007 1^{b}	0.013 6±0.006 2^{ab}	0.008 1±0.006 4^{b}	0.024 8±0.005 9^{a}
钴 Co	1.31±0.14	0.81±0.41	0.79±0.49	1.35±0.09
铜 Cu	0.93±0.64	0.20±0.08	0.14±0.05	0.61±0.74
肾脏 Kidney				
铁 Fe	33.19±7.70	41.71±4.3	32.55±7.72	40.53±6.27
锰 Mn	0.23±0.19	0.09±0.08	0.19±0.20	0.30±0.32
锌 Zn	12.30±0.73^{b}	16.44±3.25^{a}	11.35±2.22^{b}	13.81±1.07^{ab}
碘 I	0.020 6±0.013 4^{a}	0.007 1±0.003 2^{b}	0.002 4±0.001 2^{b}	0.013 6±0.000 4^{ab}
钴 Co	0.49±0.06	0.52±0.04	0.52±0.06	0.56±0.06
铜 Cu	0.43±0.07	0.55±0.17	0.49±0.22	0.55±0.04

3 讨 论

3.1 微量元素对生产性能、能量代谢、营养物质代谢的影响

本试验结果表明，在相同的基础饲粮条件下，微量元素的添加水平不同对陕北白绒山羊的干物质采食量有显著影响。杨文平等[14]对晋中绵羊添加微量元素后，采食量有显著提高。而杨菊清等[15]对放牧条件下绵羊添加微量元素后发现，采食量变化不显著。这可能和饲粮中本身的微量元素水平有关，当饲粮中微量元素能满足机体需要时，微量元素的添加水平对于采食量影响不显著，当不满足时，微量元素的添加水平会提高采食量。料重比随着微量元素添加水平的提高呈现出先增加再降低的趋势，说明微量元素添加水平的不同可以改变山羊对饲粮的消化率。本试验中料重比和已有的研究相比总体较高，可能与羊的品种有关，刘凯[16]研究湖羊料重比在 6.10~7.50、李伟玲[17]研究内蒙古羯羊的料重比在 9.17~11.74，而陕北白绒山羊以产绒为主，产肉率低于肉羊，所以料重比总体较高。

本试验中，4 个微量元素水平组的总能消化率和总能代谢率都远远小于王惠[18]的研究结果，王惠[18]研究结果得出，陕北白绒山羊的总能消化率为 62.45%~69.66%，而本试验的总能消化率为 50.16%~60.73%，但本试验试验羊的干物质采食量要远远大于该研究，该研究的

饲粮消化能与本试验结果相近，总能低于本试验。另外本试验中，干物质采食量介于0.97~1.03 kg/d，而王惠[18]的研究结果介于 683.54 ~754.00 g/d。造成总能消化率和总能代谢率较低的原因可能是由试验羊的年龄差异所导致，王惠[18]试验中采用的是 1.5 周岁的空怀期母羊，本试验中采用的是 6 月龄的母羊，同时使用饲粮种类不相同也可能造成影响。有关饲粮中添加不同水平微量元素对能量代谢的影响还有待进一步研究。目前，有关饲粮中不同微量元素添加水平对于动物氮代谢的影响的研究还鲜有报道。贾少敏[19]研究结果表明，通过不同的饲喂方式，肉羊的氮沉积率为 51.12%~61.12%，与本试验结果相近，但本试验的结果中Ⅱ、Ⅲ组高于 61.12%，证明Ⅱ、Ⅲ组微量元素水平对山羊氮代谢的影响较大。而且可消化氮和沉积氮的变化趋势均呈现先上升后下降的趋势，说明微量元素添加水平可以影响陕北白绒山羊对氮的利用，Ⅱ组的添加水平更接近于陕北白绒山羊的最适需求量。

本试验中，各组总能没有显著差异，但随着饲粮中的微量元素的增加，粪能、尿能、甲烷能会随着微量元素水平的升高均有上升的趋势，所以当微量元素添加水平过多时，会造成排泄物中能量的提升，造成能量的浪费。同时代谢能和总能消化率也有呈现先上升后下降趋势，所以微量元素的添加水平不宜过高。

田海宁[20]给藏绵羊分别添加 5、10、15 mg/kg 铜，发现饲粮中添加 10 mg/kg 铜的绵羊平均日增重和料重比显著优于其他 2 组，与本试验结果相似。李文才[21]在小尾寒羊瘤胃液中添加不同水平的铜后发现，适当的增加硫酸铜的水平有利于瘤胃微生物对麦秸、苜蓿等粗饲料的消化。刘海英等[22]在辽宁绒山羊饲粮中添加不同水平的锌，测定其对羊绒生长的影响，发现不同水平的锌对辽宁绒山羊羊绒生长和细度没有显著影响；但是细度和粗毛长度随着锌水平的添加的提高而提高。王润莲[23]在肉羊饲粮中添加不同水平的钴，发现饲粮中添加 0.25~0.50 mg/kg 的钴，可以有效增强瘤胃微生物合成维生素 B_{12}，同时增加瘤胃中总挥发性脂肪酸的产生并增加其中丙酸的比例。Biswas 等[24]对奶牛进行补饲锰后，发现可以显著提高瘤胃对饲粮的消化。Salamone 等[25]在羔羊饲粮中添加不同水平的硫酸亚铁，发现提高硫酸亚铁的添加水平对羔羊采食量以及平均日增重没有显著影响。

本试验结果发现，微量元素的表观代谢率普遍偏低，说明陕北白绒山羊对微量元素的利用率很低。饲粮中微量元素水平从Ⅰ组到Ⅳ组逐渐增加的过程中，铜、铁、锰、锌、钴代谢率呈现先升高后下降的趋势，与张微等[26]研究结果的相近。本试验中，Ⅱ组各微量元素的

代谢率均有较高。

3.2　微量元素在组织中的沉积

微量元素在组织中的沉积受诸多因素影响，羔羊生长速度与品种、性别、生长阶段及营养水平等有密切关系，微量元素在动物组织中的分布和其组织代谢特点有关[27]。在不同部位的同一类组织中，由于其生理机能和代谢水平的不同，微量元素在其中的分布也有很大差异。其在各组织中的分布规律受到动物品种、性别、体重及饲喂水平等因素的影响[28-29]，机体内的物质，如糖、蛋白质、脂肪等含有的羟基以及氨基等可以提供孤对电子的基团，可以与微量元素之间形成配位键，促进微量元素的吸收以及利用。除了形成配位键外，多糖分子中含有游离氨基（$-NH_2$），且$-NH_2$邻位是羟基（-OH）可借氢键，也可借盐键形成具有类似网状结构的笼形分子，从而对金属离子有着稳定的吸附能力[30]。

3.2.1　铜在组织中的沉积

铜在动物体内亚铁氧化酶、细胞色素C氧化酶、铜锌超氧化物歧化酶等多种关键酶系统中发挥重要作用[31]。而且参与多项生化功能，如电子传递、氧化应激反应、运输和降解、歧化超氧化物[32]。已有研究表明，肝脏可以调控机体组织微量元素的含量[33]，肝脏中微量元素的含量不仅可以反映对饲粮微量元素的吸收效率，而且可以反映微量元素添加水平是否满足动物需要[34]。肝脏是大部分微量元素代谢和贮存的主要场所，检测动物肝脏可得到有关体内微量元素水平最可靠的资料，反映出动物微量元素的营养状况。Solaiman等[35]的研究表明，山羊饲粮铜含量为252 mg/kg时比其他组(饲粮铜含量为187、472 mg/kg）的增重更高，适宜的铜添加水平有利动物生长。本试验中铜在肝脏中的沉积量的变化和生产性能变化趋势一致，而在其他脏器中均没有类似的变化趋势，反映出肝脏中铜的沉积量和山羊生产性能有一定的联系。在我国养殖行业中，有通过增加饲粮中铜的含量进而促进动物的成长发育的例子，从本试验结果来看铜的添加水平有最适量，超过最适量不仅会妨碍生长同时排泄物中铜含量增加影响环境，在添加铜的情况下需添加高锌和高铁以保证动物正常的生理生化代谢[36]。

3.2.2　锰和铁在组织中的沉积

Cumming等[37]研究表明，锰是丙酮酸羧化酶的组成部分，在脂肪或丙酮酸转化成草酰乙酸和葡萄糖的代谢过程中起重要作用。这说明锰能提高葡萄糖利用和促进脂肪组织分解，

为机体蛋白质合成提供能量，并通过激活转氨酶进一步提高机体蛋白质合成。有研究报道，饲粮中的锰含量会影响水貂血清中乳酸脱氢酶（LDH）的活性，当饲粮中缺乏锰时，肝脏以及睾丸中LDH活性同步下降，这和锰在这些组织中大量聚集有关，表明饲粮中添加适宜水平锰可以提高血清中LDH的活性[38]。铁是机体生理生化代谢重要参与元素，除了是很多酶以及蛋白质的组成部分，同时还是很多生理生化反应的催化剂。除肝脏之外的其他脏器中铁和锰沉积均呈现出相反的趋势，高铁含量对锰的抑制作用已在人等哺乳动物及鸡的研究中有一致的报道[39]。有研究表明，铜和铁之间存在拮抗作用，表现在脾脏沉积之中[40]。本试验中，铜和铁沉积呈现相反的趋势与前人研究结果一致。

3.2.3　锌和钴在组织中的沉积

锌是许多酶的组成成分和激活剂，因此它在动物生命过程中主要是通过调节体内某些酶的活性而发挥作用的[41]。各种动物对高锌都有较强的耐受力，但耐受力随动物种类、生长阶段以及饲粮中锌拮抗物的量不同而异。反刍动物比单胃动物敏感，易产生中毒现象，反刍动物仅能耐受超过需要量的10倍的锌[42]。机体中肝脏和胰脏是锌的沉积和代谢的主要场所，所以肝脏和胰脏的锌沉积量反映出机体代谢水平。本试验中锌在内脏中的沉积量均呈现出先上升后下降的趋势。在体内，钴和维生素B_{12}含量有很强的相关性，钴主要以维生素B_{12}和辅酶的形式贮存于肝脏之中，发挥其生物学作用[43]。本试验中，随着微量元素添加水平的增加肝脏中钴的沉积量逐渐上升，说明钴的添加水平还没能达到最佳量。

本试验一部分微量元素在组织中的沉积量在各组间并不存在显著性差异，可能是因为2点原因造成，一是饲粮中不同微量元素添加水平是根据NRC（2007）[7]推荐量设计的，没有满足陕北白绒山羊需求，在山羊体内的消化、吸收、代谢、排泄过程中以及微量元素之间的协调、拮抗作用等因素的影响下导致沉积量差异不显著；二是不同微量元素在不同的组织内作用不同，需求量也有所差异，所以导致在沉积量差异不显著。

4　结　论

①饲粮中微量元素水平能够显著地影响陕北白绒山羊的能量代谢和氮代谢，进而影响生产性能以及在微量元素在组织中的沉积量。

②本试验条件下，陕北白绒山羊微量元素需要量的最佳组合为：铁 290.14 mg/kg、铜 18.19 mg/kg、锌 81.62 mg/kg、锰 94.10 mg/kg、钴 0.31 mg/kg。

参考文献：

[1] BRUGGER D,BUFFLER M,WINDISCH W.Development of an experimental model to assess the bioavailability of zinc in practical piglet diets[J].Archives of Animal Nutrition,2014,68(2):73–92.

[2] NRC.Nutrient requirements of goats:angora,dairy,and meat goats in temperate and tropical countries[S].Washington,D.C.:National Academy Press,1981.

[3] AFRC.Technical committee on responses to nutrients,report 10.The nutrition of goats[J].Nutrition Abstracts and Reviews,1997,67(11):806–815.

[4] NRC.Nutrition requirements of sheep,sixth revised edn[S].Washington， D.C.:National Academies Press,1985.

[5] 吕爱军,穆阿丽,杨维仁,等.不同钼、硫水平对小尾寒羊铜需要量影响的研究[J].中国草食动物科学,2016,36(4):19–23.

[6] SOLAIMAN S G,MALONEY M A,QURESHI M A,et al.Effects of high copper supplements on performance,health,plasma copper and enzymes in goats[J].Small Ruminant Research,2001,41(2):127–139.

[7] NRC.Nutrient Requirements of small ruminants:sheep,goats,cervids,and new world camelids[S].Washington,D.C.:National Academy Press,2007.

[8] 董辉.日粮能量和蛋白质水平对陕北白绒山羊生产性能、养分表观消化率及血液生化指标的影响研究[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2013.

[9] 高晔,李碧波,黄帅,等.陕北白绒山羊羯羊能量和蛋白质需要量[J].动物营养学报,2016,28(3):720–730.

[10] 王浩.日粮不同钙、磷水平及比例对陕北白绒山羊断奶羔羊生产性能、养分消化和血清指标的影响[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2016.

[11] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].2 版.北京:中国农业大学出版社,2003.

[12] 贺建华.饲料分析与检测[M].2 版.北京:中国农业出版社,2011.

[13] BLAXTER K L,CLAPPERTON J L.Prediction of the amount of methane produced by ruminants[J].British Journal of Nutrition,1965,19(4):511.

[14] 杨文平,岳文斌,董玉珍,等.添加不同水平锌、铁和钴对绵羊增重及体内代谢的影响[J].饲粮研究,2000(3):11–12.

[15] 杨菊清,雒秋江,杨开伦,等.添喂复合微量元素对伊犁夏牧场放牧绵羊消化代谢的影响[J].新疆农业大学学报,2015,38(3):173–180.

[16] 刘凯.甜菜碱和过瘤胃脂肪对育肥羊生产性能和肌肉脂肪酸组成的影响[D].硕士学位论文.兰州:兰州大学,2016:20–21.

[17] 李伟玲.桑叶对肉羊生产性能、血液生化指标、免疫抗氧化功能和肉品质的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2012:14–15.

[18] 王惠. 空怀期及妊娠期陕北白绒山羊能量需要量研究[D]. 硕士学位论文. 杨凌：西北农林科技大学, 2012.

[19] 贾少敏.肉用母羔羊生长期(20~35 kg)能量和蛋白需要量的研究[D].硕士学位论文.保定:河北农业大学,2013:20–21.

[20] 田海宁.饲料中添加铜对绵羊增重的影响[J].当代畜牧,2004(11):14–15.

[21] 李文才.体外发酵添加硫酸铜对小尾寒羊瘤胃挥发性脂肪酸的影响[J].中国草食动物科学,2015,35(6):66–68.

[22] 刘海英,杨桂芹,李学俭,等.不同日粮锌水平对辽宁绒山羊公羊绒毛生长,血浆睾酮和锌含量的影响[C]//2015 年全国养羊生产与学术研讨会论文集.登封:中国畜牧兽医学会,2015.

[23] 王润莲. 钴对肉羊维生素 B_{12} 营养状况的影响及其生物学效应研究[D]. 博士学位论文. 北京：中国农业大学.

[24] BISWAS P K,BISWAS P.*In vitro* evaluation of a diet supplemented with Mn on nutrient digestibility and rumen fermentation pattern in cattle[J].Exploratory Animal & Medical Research,2012,1(2):161–166.

[25] SALAMONE A M,ABUGHAZALEH A A,STUEMKE C.Effect of dietary supplementation of ferrous sulfate on performance and carcass characteristics of finishing lambs[J].Journal of Animal Research and Technology,2012,1(1):7–12.

[26] 张微,朱晓萍,卢德勋,等.内蒙古白绒山羊生绒期日粮适宜铜水平研究[J].中国农业大学学

学报,2004,9(3):36–40.
[27] FRY R S,ASHWELL M S,LLOYD K E,et al.Amount and source of dietary copper affects small intestine morphology,duodenal lipid peroxidation,hepatic oxidative stress,and mRNA expression of hepatic copper regulatory proteins in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,2012,90(9):3112–3119.
[28] BELLOF G,MOST E,PALLAUF J.Concentration of copper,iron,manganese and zinc in muscle,fat and bone tissue of lambs of the breed German merino landsheep in the course of the growing period and different feeding intensities[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2007,91(3/4):100–108.
[29] CASTELLANO R,AGUINAGA M A,NIETO R,et al.Changes in body content of iron,copper and zinc in Iberian suckling piglets under different nutritional managements[J].Animal Feed Science and Technology,2013,180(1/2/3/4):101–110.
[30] 贾辉.壳寡糖及其金属离子配合物的合成研究[D].硕士学位论文.天津:天津工业大学,2017.
[31] 李高鹏,张焱.必需金属的生物信息学研究现状与展望[J].化学进展,2013,25(4):446–456.
[32] PEÑA M M O,LEE J,THIELE D J.A Delicate balance:homeostatic control of copper uptake and distribution[J].Journal of Nutrition,1999,129(7):1251–1260.
[33] WILLEMS H,LEIBER F,KOHLER M,et al.Altitude,pasture type,and sheep breed affect bone metabolism and serum 25-hydroxyvitamin D in grazing lambs[J].Journal of Applied Physiology,2013,114(10):1441–1450.
[34] GOWANLOCK D W,MAHAN D C,JOLLIFF J S,et al.Evaluating the influence of National Research Council levels of copper,iron,manganese,and zinc using organic (Bioplex) minerals on resulting tissue mineral concentrations,metallothionein,and liver antioxidant enzymes in grower-finisher swine diets[J].Journal of Animal Science,2015,93(3):1149–1156.
[35] SOLAIMAN S G,REDDY T J,Jr.,SHOEMAKER G R C E.Effect of high levels of Cu supplement on growth performance,rumen fermentation,and immune responses in goat kids[J].Small Ruminant Research,2007,69(1/2/3):115–123.

[36] 田佳,刘国华,蔡辉益,等.22～42 日龄肉鸡铜、铁、锌、锰不同用量组合的研究[J].动物营养学报,2016,28(11):3660–3668.

[37] CUMMING I.The mineral nutrition of livestock[J].The Veterinary Journal,2001,61(1):70–71.

[38] 张海华,南韦肖,王士勇,等.饲粮锰水平对冬毛期水貂生长性能、营养物质消化率及氮代谢的影响[J].动物营养学报,2015,27(10):3279–3284.

[39] 林月霞,罗绪刚,王志跃.肉仔鸡锰营养需要量研究进展[J].中国畜牧杂志,2006,42(15):45–47.

[40] 王希春,吴金节,李义刚,等.高铜日粮对断奶仔猪血清及组织中铜、铁、锌沉积的影响[J].南京农业大学学报,2006,29(1):72–76.

[41] CHASAPIS C T,LOUTSIDOU A C,SPILIOPOULOU C A,et al.Zinc and human health:an update[J].Archives of Toxicology,2012,86(4):521–534.

[42] 王慧,黄美州,王胜义,等.微量元素硒、铜、锌在饲料添加应用中存在的问题与对策[J].畜牧与兽医,2015,47(8):123–126.

[43] 夏学强,段美玲.反刍家畜的钴营养及其缺乏症[J].养殖技术顾问,2012(10):64–65.

Trace Element Requirements of Weaned Lambs of *Shaanbei* White Cashmere Goats

ZHOU Guangchen WANG Hao LIN Changlong CHEN Yulin* YANG Yuxin*

(*College of Animal Science and Technology, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100， *China*)

Abstract: This study was conducted to evaluate effects of different levels of dietary trace elements on performance, nutrients digestion and metabolism， trace element deposition in tissues of weaned lambs of *Shaanbei* white cashmere goats. Twenty-four 6-month old weaned lambs of *Shaanbei* cashmere goats with about 20 kg of body weight were selected and randomly assigned to four groups, each group had three replicates， and each replicate had 2 lambs. The goats in different groups were fed diets containing different trace elements levels. In group Ⅰ, iron, copper, zinc, manganese and cobalt contents in diet were 279.30, 15.35, 63.41, 68.51 and 0.22 mg/kg,

*Corresponding authors：CHEN Yulin， professor, E-mail: yangyuxin2002@126.com; YANG Yuxin, associate professor, E-mail: yangyuxin2002@126.com （责任编辑 王智航）

respectively, in group Ⅱ, those were 290.14, 18.19, 81.62 and 94.10 mg/kg, respectively, in group Ⅲ, **those were** 302.23, 28.20, 103.28, 133.85 and 0.43 mg/kg, respectively, in group Ⅳ, **those were** 319.74, 31.60, 126.64, 167.07 and 0.67 mg/kg, respectively. The feeding trial lasted for 65 d including 5 d of pre-test period and 60 d of test period. On day 30 of test period in feeding trial, one lamb from each repeat was selected and fed individually in cage to carry out digestion and metabolism test. The pre-test period was 7 d, and the test was 7 d. At the last day of feeding trial, the rest 12 lambs were slaughtered to collected heart, liver, spleen, kidney and the *longissimus dorsi*, and trace element deposition were determined. The results showed as follows: 1) average daily gain and feed to gain ratio in group Ⅱ were significantly higher or lower than those in group Ⅰ（$P<0.05$）, and had no significant difference with those in groups Ⅲ and Ⅳ（$P>0.05$）; dry matter intake in group Ⅱ was significantly higher than that in the other groups（$P<0.05$）. 2) Fecal energy and urine energy in groups Ⅰ and Ⅱ were significantly lower than those in groups Ⅲ and Ⅳ（$P<0.05$）, and gross energy digestibility was significantly higher than that in groups Ⅲ and Ⅳ（$P<0.05$）. 3) Nitrogen retention rate, nitrogen intake, digestible nitrogen and retention nitrogen in group Ⅲ were the highest, and were significantly higher than those in groups Ⅰ and Ⅳ（$P<0.05$）, but had no significant differences compared with group Ⅱ（$P>0.05$）. 4) With the increase of supplemental levels of trace elements, apparent metabolic rate of trace elements were firstly increased and then decreased, and apparent metabolic rates of iron, copper, zinc, manganese and cobalt in group Ⅱ were the highest. 5) Group Ⅱ had the highest manganese deposition rate in *longissimus dorsi* and heart, and the highest iron, iodine, copper and manganese deposition in liver; in spleen, iron deposition in group Ⅱ was the highest, iodine deposition in group Ⅳ was the highest; in kidney, zinc deposition in group Ⅱ was the highest, and iodine deposition in group Ⅰ was the highest. Under the conditions in the present study, the optimal combination of trace element requirements for *Shaanbei* white cashmere goats were as follows: iron 290.14 mg/kg, copper 18.19 mg/kg, zinc 81.62 mg/k, manganese 94.10 mg/kg and cobalt 0.31 mg/kg.

Key words: *Shaanbei* white cashmere goats; trace elements; performance; tissue deposition